

EFFETTO DEL PRE-STRESS SUL COMPORTAMENTO A FATICA DI ELEMENTI INTAGLIATI IN ACCIAIO INOSSIDABILE

D. Crivelli^{a,1}, M. Guagliano^{a,2}

^a Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica,
via La Masa 1, 20156 Milano

¹ e-mail: davide.crivelli@polimi.it

² e-mail: mario.guagliano@polimi.it

Sommario

Il trattamento di pretensionamento, o pre-stress, consiste nel sovraccaricare gli elementi di macchina con valori delle forze applicate tali da eccedere localmente, nei punti critici, lo sforzo di snervamento del materiale. In questo modo è possibile generare tensioni residue superficiali di compressione che contribuiscono a migliorare la resistenza a fatica degli elementi trattati. In questo lavoro si analizza il comportamento di provini intagliati di acciaio inox, precedentemente pretensionati e poi sollecitati a fatica assiale. La geometria dei provini è stata disegnata in modo da riprodurre nella maniera più fedele l'andamento degli sforzi nelle zone critiche rispetto all'elemento di macchina considerato. La misura degli sforzi residui e della rugosità, oltre all'analisi delle superfici di frattura hanno permesso di completare la caratterizzazione del comportamento dei provini dopo il trattamento di pre-stress. I risultati sono discussi criticamente e permettono di trarre indicazioni utili in sede di progetto.

Abstract

The pre-stress treatment consists of overloading machine elements with forces able to locally exceed in critical areas the yield strength of the material. In this way, it is possible to create compressive residual stresses able to improve the fatigue behaviour of machine elements. In this work, the fatigue behaviour of notched pre-stressed specimens made of stainless steel under axial fatigue. The specimens were designed to reproduce the notch effect and the stress gradient of the real machine element as closer as possible. The measurement of residual stresses, hardness and surface roughness as well as fracture surface analysis allowed to complete the characterization of the specimens behaviour after pre-stress. The results are then discussed and allow gathering useful information for the design phase.

Parole chiave: pre-stress, sforzi residui, fatica, acciai inox

1. INTRODUZIONE

La sempre maggiore richiesta di prestazioni, leggerezza, maggiore efficienza energetica che caratterizza il presente contesto industriale, ormai alle prese con un mercato di scala mondiale, sta spingendo gli attori di molti settori verso soluzioni tecniche e progettuali un tempo destinate ai soli campi definiti a maggior contenuto tecnologico, quali l'aeronautica o l'industria automobilistica. Se si concentra l'attenzione sulla resistenza a fatica e sul cosiddetto "fatigue design", cioè quella parte della progettazione meccanica finalizzata alla verifica a fatica, all'individuazione di tutte i possibili accorgimenti di progetto per migliorare la resistenza a fatica di una macchina e alla loro introduzione nel ciclo di progetto dei sistemi meccanici, ciò implica la definizione e la progettazione di trattamenti superficiali in grado di migliorare le prestazioni di un sistema senza che sia necessario aumentarne gli

ingombri e il peso. Anzi, l'applicazione di questi trattamenti può voler dire la possibilità di ridurre, a pari o migliori prestazioni, le dimensioni di un sistema.

Tra i trattamenti finalizzati a questo scopo sono sempre più popolari i cosiddetti trattamenti meccanici, nei quali l'effetto desiderato è ottenuto inducendo nelle zone critiche di un pezzo, una deformazione plastica non uniforme, grazie alla quale il materiale viene localmente incrudito. Allo stesso tempo, con tali trattamenti, si genera un campo di tensioni residue di compressione negli strati superficiali del pezzo [1].

All'azione sinergica delle tensioni residue e dell'incrudimento superficiale è imputabile il miglior comportamento a fatica dei pezzi trattati; in particolare, per quanto riguarda i trattamenti meccanici, è alle tensioni residue che viene imputato il maggior contributo in questo senso, anche se l'effettiva importanza di queste ultime e dell'incrudimento superficiale varia caso per caso e dipende dai parametri di trattamento, dal materiale da trattare, dalle condizioni di sollecitazione del pezzo trattato.

Tra i trattamenti meccanici la pallinatura, o shot peening [2-5], è senza dubbio il più popolare, grazie alla sua flessibilità e alle conoscenze acquisite negli ultimi 30 anni, in cui è stato ampiamente investigato sia sperimentalmente che numericamente, al fine di trovare delle correlazioni analitiche tra parametri di trattamento, tensioni residue e resistenza a fatica. Più recentemente si è anche investigata con successo la possibilità di applicarlo per ridurre le dimensioni dei grani cristallini a qualche decina di nanometri in modo da conferire al materiale caratteristiche superiori [6]. Gli studi eseguiti hanno permesso di modificare l'approccio di applicazione della pallinatura da empirico, basato su esperienze precedenti e sulla sensibilità ed esperienza degli operatori coinvolti, ad analitico [7-9], basato sull'analisi dei materiali in gioco, dello stato di sforzo dei componenti da trattare e sulla conoscenza delle tensioni residue indotte dal trattamento. In questo modo è possibile formulare delle previsioni del miglioramento della resistenza o della durata a fatica attesa. Ciò ha consentito al trattamento di pallinatura di entrare nel ciclo di progettazione del componente e di non essere considerato solo come palliativo da utilizzarsi giusto in presenza di problemi o inattese rotture verificatesi in esercizio.

Anche la rullatura [10,11] è stata oggetto di studi di questo tipo, anche se alcuni limiti legati alla geometria dei pezzi da trattare (che devono essere in massima parte assialsimmetrici) unitamente alla maggiore complessità operativa del trattamento ne hanno limitato la diffusione in ambito industriale. Altri trattamenti superficiali meccanici dei quali è provata l'efficacia, quali la martellatura, sono oggi utilizzati in situazioni particolari e di questi non si ha a disposizione una base conoscitiva adeguata per un loro utilizzo in grande scala [11].

Tutti i trattamenti sopra menzionati necessitano, per essere utilizzati, di apposite macchine. Il che vuol dire che il pezzo, prima di essere montato (i trattamenti meccanici sono il più delle volte l'ultima lavorazione meccanica prima del montaggio del sistema), deve essere inviato in officina o, come capita il più delle volte, presso un'azienda specializzata per la loro esecuzione.

Al contrario, il cosiddetto trattamento di pretensionamento, o, più comunemente pre-stress [1,3,11,12], non richiede necessariamente di alloggiare il pezzo su una macchina dedicata ma può essere eseguito ultimato l'assemblaggio del sistema. Il pre-stress, infatti, consiste nell'applicare staticamente al pezzo di interesse un carico maggiore di quello al quale lo stesso sarà sollecitato a fatica. Il carico deve essere tale da indurre la plasticizzazione locale nelle zone critiche del pezzo, laddove si attende l'inizio del danneggiamento per fatica. Risulta, quindi, evidente che con questo trattamento l'incrudimento superficiale e la conseguente introduzione delle tensioni residue di compressione negli strati superficiali del pezzo, non richiedono l'utilizzo di un apposito utensile ma solo la capacità di applicare al pezzo carichi di entità adeguata. Ciò in alcuni casi costituisce un limite applicativo importante; si pensi ai pezzi di grosse dimensioni sollecitati a trazione, flessione o torsione, per ottenere la plasticizzazione dei quali sarebbero necessarie apposite e costose attrezzature, oltre che dei tempi di preparazione ed allestimento poco competitivi. Vi sono, però, alcune situazioni in cui il pre-stress può divenire un serio sostituto dei trattamenti prima sommariamente descritti e, in alcuni casi, può essere eseguito ad assemblaggio terminato, senza aumentare il tempo e il costo complessivo del ciclo tecnologico di costruzione del sistema meccanico d'interesse. Tra questi casi si può annoverare quello delle macchine e degli organi rotanti, per le quali la relazione quadratica (in campo elastico lineare) tra la velocità di rotazione e le forze di volume che si generano permette di plasticizzare dettagli geometrici caratterizzati da elevato effetto di intaglio con sovraccarichi sopportabili dall'intera macchina senza mettere a repentaglio la sua funzionalità e integrità strutturale.

In questa memoria si descrive e si analizza il caso di un componente rotante filettato montato in una macchina rotante, caratterizzato da un coefficiente di intaglio teorico K_t elevato e tale da limitare le prestazioni a fatica dell'intera macchina. Si è quindi valutata l'opzione di applicare il pre-stress per migliorare la sua resistenza a fatica e, con essa, le prestazioni della macchina.

Ciò ha richiesto la progettazione del trattamento di pre-stress sulla base dello stato di sforzo del componente e dell'entità delle tensioni residue desiderate, nonché del miglioramento delle prestazioni a fatica attese. A tal fine sono anche state eseguite una serie di prove di fatica assiale su provini appositamente progettati e analizzati al fine di avere uno stato di sforzo nei punti critici (in particolare il gradiente degli sforzi in tali punti) il più possibile simile a quello del componente di interesse in esercizio. Una serie di prove ha anche riguardato provini già oggetto delle prove di fatica e in seguito sottoposti al pre-stress, al fine di verificare la possibile e positiva applicazione del pre-stress a componenti già eserciti. I risultati sono stati discussi criticamente e l'efficacia del trattamento in queste applicazioni.

2. MATERIALI E COMPONENTE

Oggetto di questo lavoro è un elemento filettato che fa parte di una macchina rotante complessa. In Figura 1 è illustrato il dettaglio del componente in questione: nella figura è evidenziata la zona più sollecitata, in cui si ha un coefficiente di intaglio teorico K_t pari a 1.8.

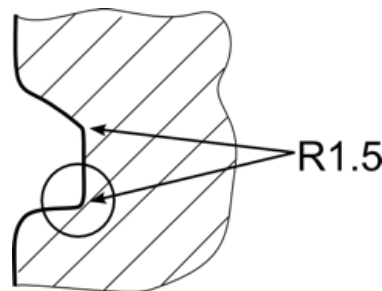


Figura 1: dettaglio del componente in esame

Il materiale utilizzato per la sua costruzione è un acciaio inossidabile austenitico con carico di rottura a trazione di 700 MPa e carico di snervamento ($R_{p0.2}$) di 490 MPa.

Come poc'anzi indicato, il componente è uno degli elementi rotanti di una macchina ed è principalmente soggetto a carichi di volume, oltre che a pressioni che variano durante il ciclo operativo della macchina. Complessivamente i carichi di esercizio inducono cicli di fatica multiassiale con rapporto di ciclo R pari a circa 0.5. Le ipotesi di progetto prevedono che i componenti siano dimensionati a fatica illimitata. Lo stato di sforzo è assialsimmetrico con sforzi principali (facendo riferimento alla zona sede dell'intaglio, in direzione normale alla superficie, tangenziale rispetto al raggio di raccordo, e circonferenziale rispetto al provino) che variano in fase tra loro; lo sforzo radiale risulta di entità trascurabile rispetto alle altre componenti del tensore degli sforzi.

Per migliorare la resistenza a fatica del componente è stato proposto di sottoporre il componente stesso al trattamento di pre-stress, applicando, a macchina assemblata, un carico superiore a quello di esercizio e tale da indurre una plasticizzazione locale della zona critica e, con essa, la generazione di un campo di tensioni residue di compressione in superficie.

La determinazione del corretto valore di pre-stress è stata eseguita, oltre che tenendo presenti i possibili problemi dovuti ad un eccessivo carico sui diversi componenti della macchina, facendo riferimento allo stato di sforzo della zona critica. Una serie di analisi a elementi finiti elastoplastiche in cui si è considerato una legge di incrudimento cinematico non lineare del materiale secondo il modello di Chaboche ha consentito di determinare l'entità degli sforzi residui indotti in funzione del sovraccarico, ipotizzando l'esecuzione di qualche ciclo di pre-stress.

I risultati delle analisi hanno evidenziato che al crescere del pre-stress si ottiene l'andamento in profondità degli sforzi residui illustrato in Figura 2: se si considera un pretensionamento del 30% superiore rispetto al carico in esercizio si nota che gli sforzi residui sono di compressione fino a circa 0.4 mm dalla superficie e presentano il valore massimo proprio in superficie per poi decrescere verso

l'interno. Questo valore di pretensionamento è stato considerato per l'effettiva esecuzione del trattamento.

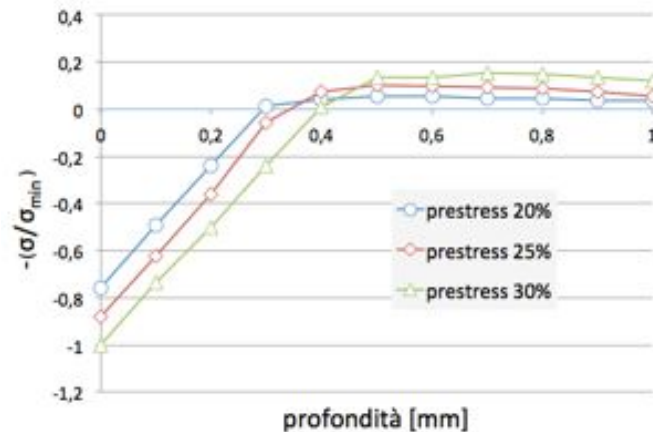


Figura 2: Andamento degli sforzi residui in profondità al variare del sovraccarico di pretensionamento (la componente di sforzo considerata è quella circonferenziale rispetto al raccordo)

3. IMPOSTAZIONE DELLE PROVE DI FATICA

3.1. Definizione del provino

Al fine di verificare l'effettiva efficacia del trattamento di pre-stress sul comportamento a fatica del componente si sono condotte prove di fatica assiale, progettate in modo da riprodurre il più fedelmente possibile lo stato di sforzo del componente e i cicli di fatica effettivi. La prima fase di questa parte del lavoro è consistita nella definizione della geometria del provino da utilizzare. Sono state ipotizzate e analizzate diverse soluzioni, cercando la massima corrispondenza dello stato di sforzo con quella del componente di interesse compatibilmente con le potenzialità della macchina di prova utilizzata.

La geometria finale del provino è illustrata in Figura 3: si tratta di un campione cilindrico intagliato con geometria che ricalca, nella zona di concentrazione degli sforzi, quella della zona critica del componente di interesse.

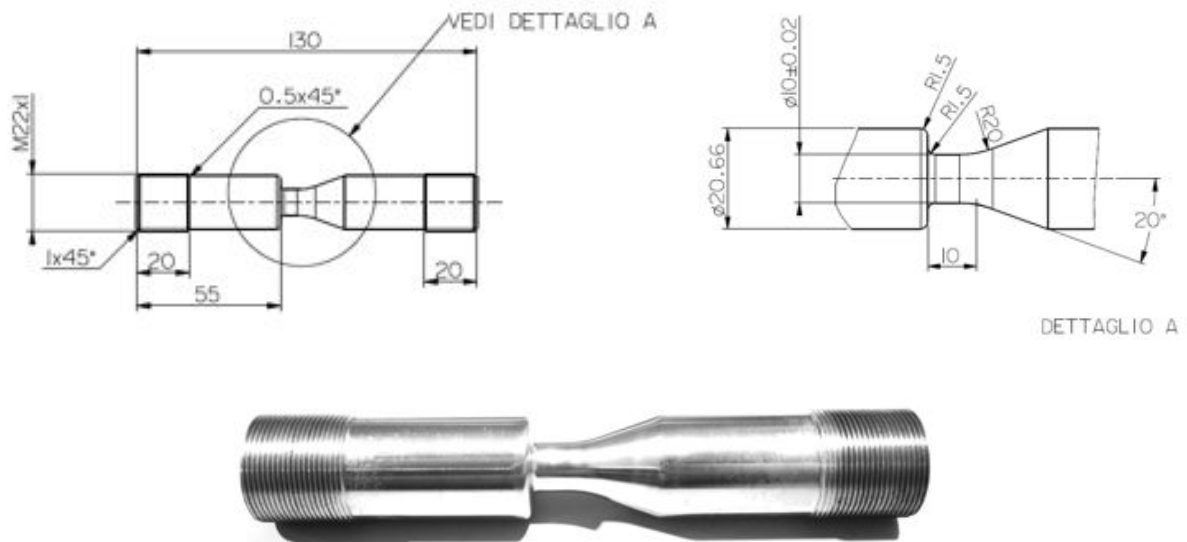


Figura 3: Geometria del provino considerato per la caratterizzazione a fatica

Tale soluzione ha consentito di realizzare uno stato di sforzo simile, nella zona del raccordo, a quello della zona critica del componente di interesse e tale da rispettarne il gradiente nella zona sede dell'effetto di intaglio. In Figura 4 si confronta l'andamento dello stato di sforzo del componente e del provino: si nota la corrispondenza degli andamenti dello sforzo tangenziale mentre, per quanto riguarda lo sforzo circonferenziale, il provino presenta un gradiente prossimo a quello del componente ma sottostima il valor massimo in superficie.

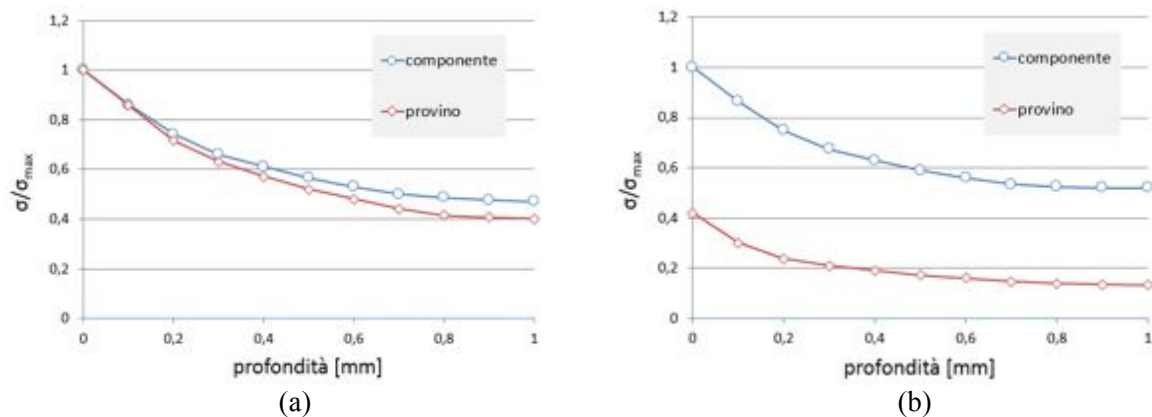


Figura 4: Andamento in profondità degli sforzi nel componente e nel provino di fatica: (a) sforzo tangenziale rispetto al raccordo, (b) sforzo circonferenziale rispetto al provino.

I provini sono stati tagliati e lavorati a partire da spezzoni degli elementi oggetto dell'analisi, in modo da rendere i risultati delle prove ancora più verosimili rispetto a quelli attesi sul componente.

3.2 Caratterizzazione del comportamento a fatica

Le prove di caratterizzazione del comportamento a fatica eseguite sui provini hanno avuto come finalità la valutazione dell'effetto migliorativo del pre-stress sulla resistenza a fatica ad alto numero di cicli. Le prove sono state impostate facendo riferimento a una procedura stair-case, ponendo 3 milioni come numero di cicli per la determinazione dei provini non rotti (run-out). Il rapporto di ciclo R è stato posto pari a 0.5, in analogia con quanto accade sulla macchina in esame.

Volendo anche verificare l'efficacia dell'applicazione del pre-stress anche su provini già eserciti, questo trattamento è stato applicato non solo a provini nuovi ma anche a provini non rotti in precedenti prove di fatica ($N=3.000.000$ cicli) con livello di sforzo prossimo alla resistenza a fatica determinata con le prove per i provini precedentemente non pretensionati.

Tre sono, quindi, le serie di provini che sono state considerate.

- Provini non pretensionati (serie NPS)
- Provini pretensionati (PS)
- Provini sottoposti a 3×10^6 cicli affaticanti e poi pretensionati (CPS)

Le prove di fatica sono state precedute dalla misura della rugosità superficiale, della microdurezza e delle tensioni residue. Lo strumento utilizzato per le misure di rugosità è un rugosimetro Mahr PGK, con uno stilo di misura con raggio di punta di $2\mu\text{m}$. Le prove di microdurezza sono state effettuate con un microdurometro FutureTech FM700.

Gli sforzi residui in prossimità del raccordo sono stati con la tecnica della diffrattometria a raggi X [13]. È stato utilizzato un diffrattometro AST X3000, dimensione di spot pari a 1mm^2 e 6 angoli di tilt positivi da 0° a 45° . Ripetendo la misura nelle 3 direzioni nel piano 0° , 45° e 90° e risalendo alla misura degli sforzi per le 3 direzioni, è possibile calcolare gli sforzi principali σ_I e σ_{II} .

Le misure sono state effettuate in superficie e a 2 diverse profondità, utilizzando un trattamento di elettropulitura in modo da non modificare il campo di sforzi.

Figura 5 è mostrato un provino posizionato al diffrattometro per una misura.

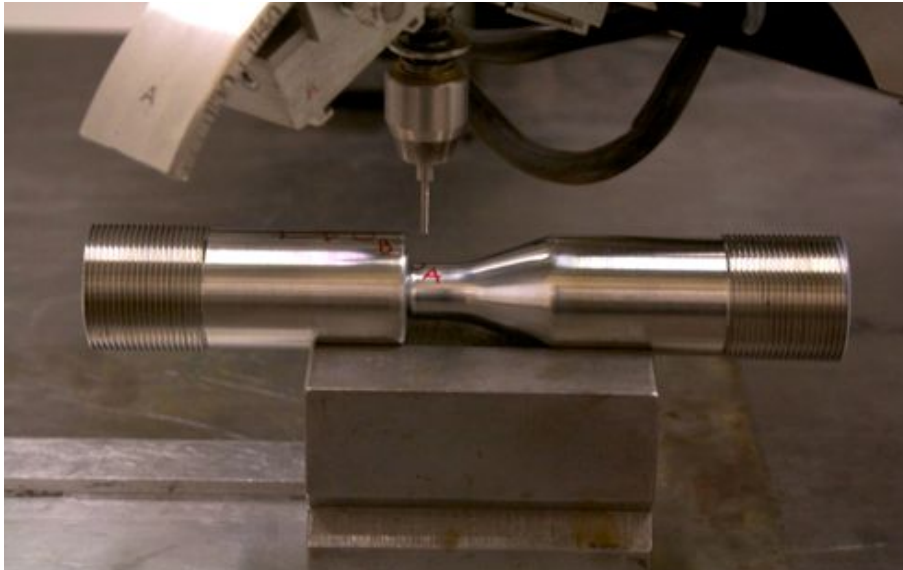


Figura 5: provino posizionato per le misure diffrattometriche

Le prove di fatica sono state effettuate su una macchina di prova a risonanza Rumul Testronic monoassiale strumentata con cella di carico $\pm 100\text{kN}$ con una frequenza di 150 Hz e monitorando la temperatura del provino dopo ciascuna prova, in modo da verificare che non vi fossero apprezzabili variazioni di temperatura dovuti all'alta frequenza;

Per quanto riguarda le serie PS e CPS, il pre-stress è stato eseguito con una macchina di prova elettromeccanica MTS Alliance RF150 monoassiale. Il carico di pre-stress è stato scelto in modo tale da indurre uno stato di sforzi residui di compressione profondo circa 0.4mm, analogo, quindi, a quanto si intende realizzare sull'elemento reale. Per ogni provino sono stati eseguiti 2 cicli di carico e scarico dallo zero fino a raggiungere il carico massimo di prova.

Al termine delle prove alcuni campioni sono stati osservati al microscopio a scansione elettronica (SEM). Quando necessario, le superfici sono state opportunamente sezionate. Le frattografie sono state eseguite a seguito di rottura delle due metà tramite idrogeno liquido, per garantire l'assenza di alterazioni alla superficie di frattura già sviluppata.

4. RISULTATI

4.1 Misura delle tensioni residue tramite diffrattometria a raggi X

A causa della struttura bifase del materiale, la misura degli sforzi residui è risultata difficoltosa con picchi di diffrazione non sempre ben definiti. Inoltre, la natura e la composizione chimica dell'acciaio ha reso difficile l'asportazione del materiale, motivo per il quale le misure si sono arrestate a pochi centesimi di profondità.

Tuttavia, i risultati hanno consentito di verificare che, mentre per i provini non trattati lo sforzo residuo superficiale è di trazione e pari a circa 100 MPa, per i provini pretensionati gli sforzi superficiali sono di compressione con valore pari a circa l'80% dello sforzo di snervamento del materiale. Infine, misure eseguite al termine delle prove hanno permesso di verificare il parziale rilassamento (30% circa) delle tensioni indotte dal pretensionamento.

4.2 Misure di rugosità superficiale

Per garantire che i provini fossero realizzati in modo conforme al disegno, e che la resistenza a fatica non fosse influenzata dalla rugosità superficiale, sono state effettuate delle prove di rugosità lungo 3 generatrici di un provino campione. In Tabella 1 si riportano i risultati delle misure; non si notano significative differenze tra le tre serie di provini.

Tabella 1: misure di rugosità superficiale

Punto di misura	Ra	Rz	Rmax
1	1.08	4.59	5.42
2	1.24	4.69	5.75
3	1.21	4.74	5.40

4.3 Misure di microdurezza

Per valutare la presenza di eventuale incrudimento sono state effettuate prove di microdurezza Vickers, utilizzando un peso di 50g e un tempo di penetrazione di 15s, sezionando il provino in prossimità del raccordo. I risultati sono riportati in Figura 6.

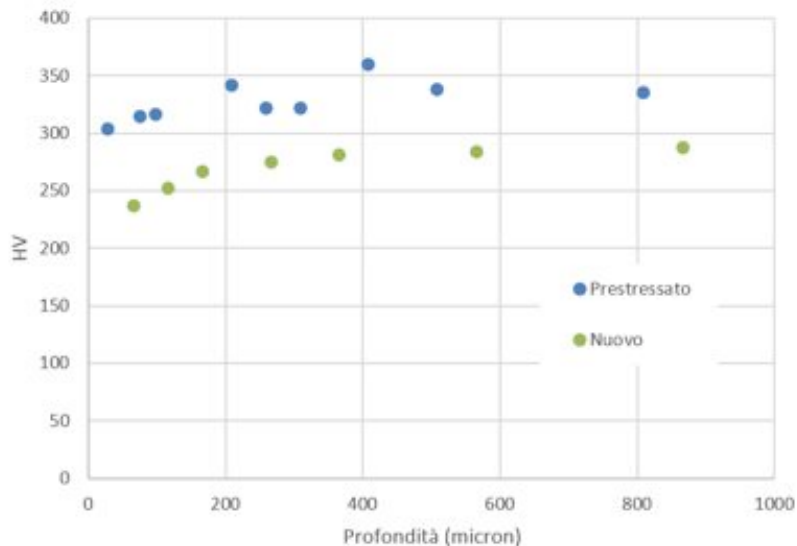


Figura 6: valori della microdurezza al variare della profondità

I valori di microdurezza mostrano come l'andamento per entrambi i provini sia confrontabile anche se i provini pretensionati mostrano valori maggiori in superficie che possono essere imputati al trattamento subito.

4.4 Resistenza a fatica

Le prove hanno mostrato un miglioramento apprezzabile della resistenza a fatica dei provini quando il pre-stress viene applicato (Figura 7). Tale miglioramento è presente sia nei provini PS sia nella serie CPS anche se, in questo secondo caso l'entità del miglioramento è inferiore, come è possibile osservare in Tabella 2 in cui si riporta in termini comparativi la resistenza a fatica delle tre serie ottenuta elaborando i risultati delle prove in accordo con la procedura stair-case [14].

Tabella 2: Confronto della resistenza a fatica $\Delta\sigma_{lim}$ delle tre serie di provini (run-out 3 milioni di cicli)

Serie	$\Delta\sigma_{lim}$	Dev. std
NPS	1	0,06
PS	1,10	0,01
CPS	1,07	0,03

I risultati delle prove hanno anche permesso di tracciare le curve S-N per le tre serie, mostrate in Figura 7: si nota che le curve sono tra loro parallele.

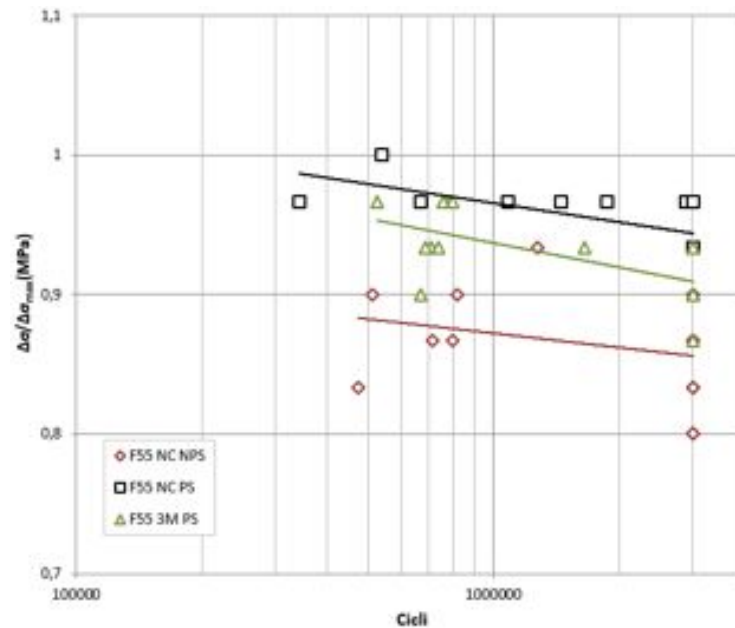
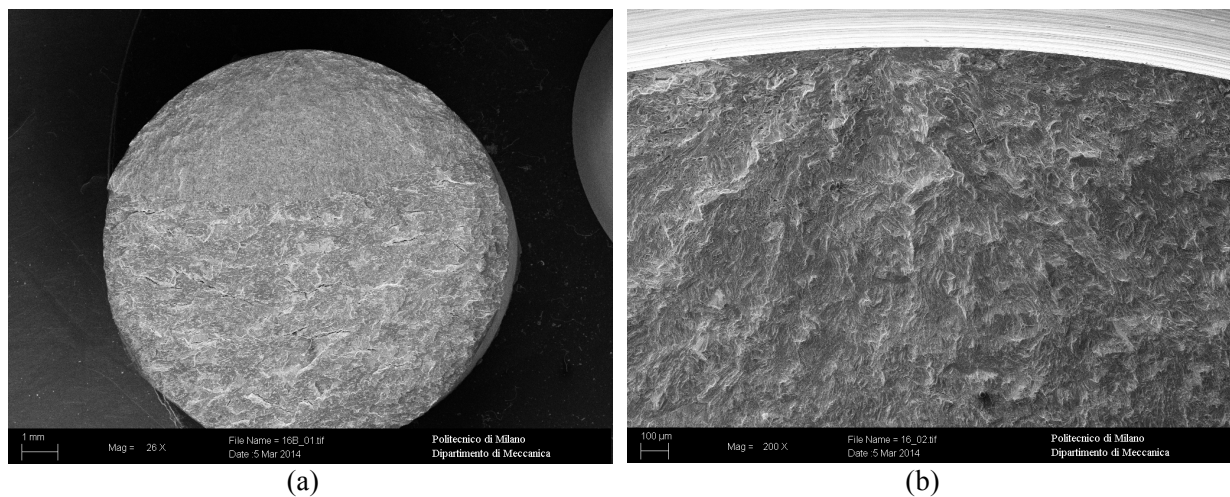


Figura 7: Curva S-N delle tre serie di provini

4.5 Frattografie

Le osservazioni al microscopio elettronico (SEM) hanno riguardato le superfici di frattura, alcune delle quali, relative ai provini NPS e CPS sono riportate in Figura 8 e hanno permesso di verificare la presenza di molteplici punti di innesco superficiale di cricche di fatica, come tipico dei provini intagliati. La presenza di sforzi residui di compressione non ha impedito che gli inneschi delle cricche fossero sulla superficie dei pezzi; anche questo può essere messo in relazione all'elevato effetto di intaglio e al conseguente gradiente degli sforzi in profondità. Le superfici di frattura delle diverse serie di provini non mostrano sostanziali differenze.



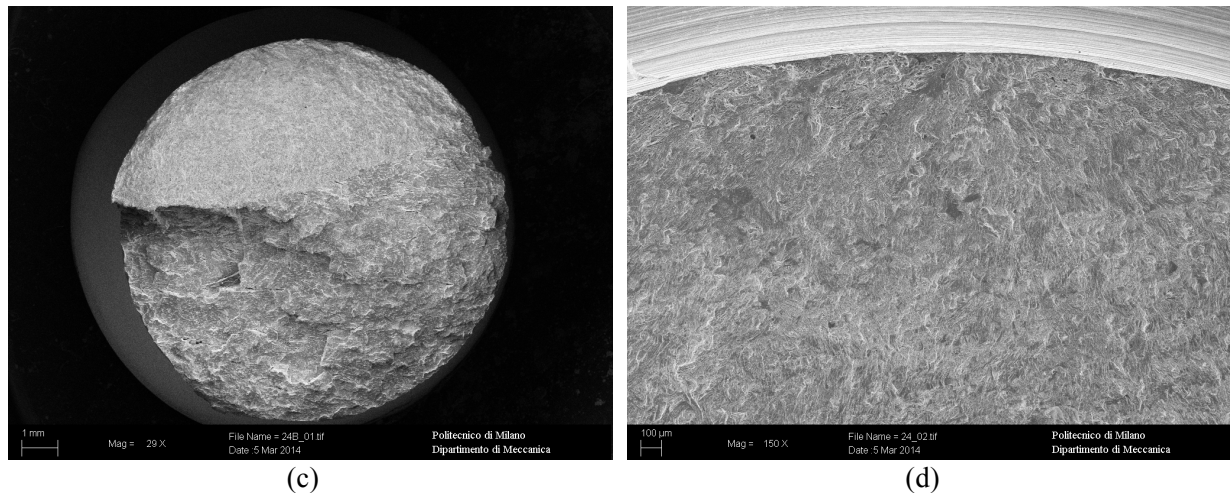


Figura 8: superfici di frattura di provini rotti per fatica: NPS (a, b) e CPS (c, d).

5. DISCUSSIONE

I risultati ottenuti mostrano un positivo effetto del pre-stress sulla resistenza a fatica degli elementi intagliati, sia sulla serie di provini vergini sia su quelli in precedenza sollecitati a fatica.

Il miglior comportamento è da mettere principalmente in relazione alla capacità del trattamento di indurre un significativo campo di sforzi residui di compressione piuttosto che all'incrudimento superficiale dovuto alla plasticizzazione che, dalle misure di microdurezza, appare poco marcato. Viceversa il campo di tensioni residue di compressione indotto dal trattamento assume valori prossimi allo snervamento in superficie e profondità efficace di circa 0.4 mm, sufficiente per modificare il comportamento a fatica ad alto numero di cicli.

I risultati delle prove condotte con cicli di fatica tali da provocare rottura dopo poche centinaia di migliaia di cicli indicano che l'efficacia del pre-stress rimane invariata anche per valori di sforzo maggiori. Il trattamento di pre-stress riduce anche la dispersione dei risultati delle prove rispetto ai provini non trattati, garantendo una più uniforme resistenza attesa.

Il miglioramento percentuale ottenuto, pari al 10%, può a prima vista sembrare modesto o, comunque, inferiore ai dati disponibili in letteratura rispetto ad altri trattamenti meccanici più diffusi, quali la pallinatura. Tuttavia, bisogna tener presente che le prove sono state eseguite con rapporto di ciclo elevato ($R=0.5$) e, quindi, con valore degli sforzi massimi elevati, prossimi allo snervamento e tali da indurre un rilassamento delle tensioni residue da trattamento. I dati relativi ad altri trattamenti reperibili in letteratura sono, in genere, relativi a rapporti di ciclo R variabili tra -1 e 0.1, per i quali il rilassamento delle tensioni residue durante la prova di fatica è meno sensibile, risultando più favorevoli ad evidenziare l'effetto positivo di un trattamento.

Nel caso dei provini eserciti, pretensionati e poi di nuovo sottoposti a prove di fatica, l'effetto del pre-stress è ancora evidente anche se meno marcato che nel caso dei provini vergini: ciò può essere spiegato tenendo in considerazione il fatto che i provini eserciti potrebbero aver subito un danneggiamento a fatica che il pre-stress è riuscito a rallentare la non a bloccare.

6. CONCLUSIONI

I risultati delle analisi eseguite hanno evidenziato la capacità del trattamento di pretensionamento di migliorare il comportamento a fatica degli elementi di macchina intagliati, anche in presenza di cicli di fatica con rapporto R poco favorevole, a enfatizzare il positivo effetto di trattamenti atti a indurre uno stato tensionale residuo di compressione in superficie.

Tale proprietà risulta particolarmente importante in tutte le situazioni, come la presente, in cui il pre-stress può essere eseguito senza smontare la macchina e, di conseguenza, senza apprezzabili costi vivi. È quindi possibile affermare che il pre-stress può essere considerato un trattamento applicabile in alternativa ad altri per migliorare la resistenza a fatica degli organi meccanici in presenza di intagli.

In particolare risulta particolarmente appetibile quando può essere applicato a macchina assemblata con sovraccarichi tali da non pregiudicare la funzionalità e l'integrità dell'intero sistema. Nel caso in esame un sovraccarico del 30% rispetto alle usuali condizioni di servizio si è rivelato sufficiente per incrementare le prestazioni a fatica del componente di un valore attorno al 10%. Tale valore può essere assunto come una prima indicazione per eventuali trattamenti di questo tipo, anche se l'accurata definizione dei parametri di trattamento richiede, caso per caso, l'analisi del legame tra le tensioni residue indotte e le condizioni di carico. In tale fase risulta utile lo sviluppo di analisi a elementi finiti che permettano di valutare lo stato di sforzo dovuto ai carichi applicati unitamente allo stato tensionale residuo atteso in funzione del carico di trattamento, sulla base delle quali informazioni è possibile formulare delle stime del miglioramento atteso della resistenza a fatica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Schulze, *Modern mechanical surface treatment, states, stability, effects*, WILEY-VCH (2006).
- [2] K. J. Marsh. *Shot peening: techniques and applications*, London: EMAS; (1993).
- [3] J. O. Almen, P. H. Black, *Residual stresses and fatigue in metals*, McGraw-Hill Publ. (1963).
- [4] H. O. Fuchs, R. I. Stephens, *Metal fatigue in engineering*. John Wiley and Sons (1980).
- [5] A. Blarasin, M. Guagliano, L. Vergani, Fatigue Crack Growth Prediction in Specimens similar to Spur Gear Teeth, *Fatigue & Fracture Of Engineering Materials & Structures*, vol. 20, 1171-1182, ISSN: 8756-758X (1997).
- [6] S. Bagheri, M. Guagliano, Review of shot peening processes to obtain nanocrystalline surfaces in metal alloys. *Surface Engineering*, Vol. 25, 1–14 (2009).
- [7] H. Guechichi, L. Catex, Fatigue limit prediction of surface treated materials, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 7, 172-381 (2006).
- [8] M. Guagliano, L. Vergani, An approach for prediction of fatigue strength of shot peened components, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, 501-512, ISSN: 0013-7944 (2004).
- [9] M. Guagliano, E. Riva, M. Guidetti, Contact fatigue failure analysis of shot-peened gears, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 9, 147-158, ISSN: 1350-6307 (2002).
- [10] L. Wagner, C. Muller, J. K. Gregory, *Effect of surface rolling and shot peening on notched fatigue strength in Al 2024*, GKSS (1993).
- [11] W. J. Harris, G. Syers, Fatigue Alleviation. *Engineering design guides*, Vol. 32. Oxford University Press for the Design Council (1979).
- [12] H. O. Fuchs. The effect of self stresses on high cycle fatigue. *Journal of Testing and Evaluation*, ASTM (1982)
- [13] I. C. Noyan, J. B. Cohen, *Residual stress measurement by diffraction and interpretation*. New York, Springer (1987).
- [14] W. Dixon, F. Massey, *Introduction to statistical analysis*. Mc-Graw Hill, New York (1969).